

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Н.М. Сапрунова
г. Челябинск, ЮУрГУ

Определены условия работы тиристоров для первого периода работы в схеме тиристорного преобразователя постоянного напряжения.

Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения, выполненные на тиристорах, применяются для электроэрозионной обработки материалов [1]. Исследование вольт-временных характеристик эрозионного промежутка приведено в работах Лившица А.Л. и др. авторов [2]. В них показано, что в первом приближении эрозионный промежуток можно представить противо-ЭДС $E_э$, если длительность импульса тока через него больше, чем 3τ , где τ – постоянная времени эрозионного промежутка.

Схема исследуемого генератора импульсов приведена на рис. 1, где VS_1 – рабочий тиристор; VS_2 – коммутирующий тиристор; R_n – токоограничивающее сопротивление; $E_э$ – противо-ЭДС нагрузки; $R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление, замыкающее контур тока при отсутствии электрического разряда в промежутке.

В задачу исследования входит определение следующих показателей работы генератора импульсов: 1) времени, предоставляемого на восстановление управляемости тиристоров VS_1 и VS_2 ; 2) максимального напряжения на конденсаторе C , тиристорах и диоде VD .

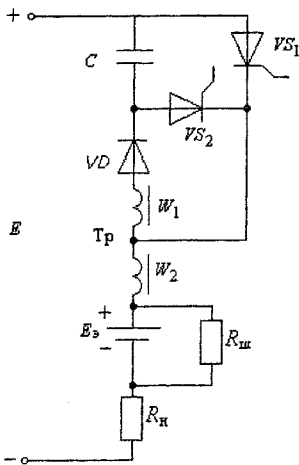


Рис. 1. Схема тиристорного генератора импульсов

При анализе схемы приняты следующие допущения: 1) тиристоры – идеальные ключи; 2) индуктивность намагничивания L_m трансформатора постоянная, а индуктивностью рассеяния можно пренебречь; 3) схема питается от источника ЭДС.

Допустим, что в первый период работы генератора не произошло разряда в эрозионном промежутке и нагрузка носит активный характер. Период работы разбит на несколько участков (рис. 2).

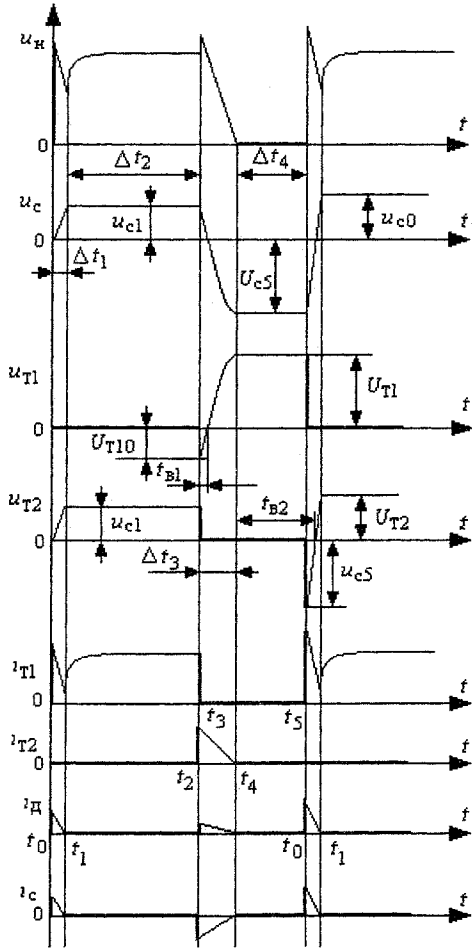


Рис. 2. Временные диаграммы работы

Соответственно принятым допущениям схема замещения для первого участка работы при включении тиристора VS_1 приведена на рис. 3, где R_d – сопротивление диода и соединительных проводов. Контур диода и конденсатора для интервала времени Δt_1 приведен к первичной обмотке трансформатора через коэффициент трансформации

$$k = w_1/w_2 : C' = c/k^2, R'_d = R_d \cdot k^2, \\ i'_2 = i_2/k, u'_c = u_c \cdot k. \tag{1}$$

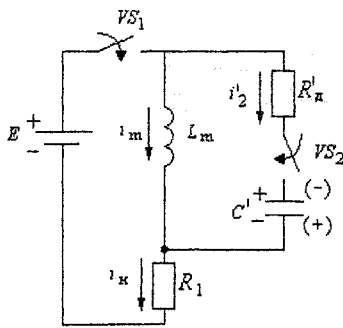


Рис. 3. Схема замещения для первого участка работы

На первом участке работы Δt_1 конденсатор заряжается до некоторого начального напряжения U_{c1} , полярность которого обозначена на рис. 3 без скобок. Наличие в схеме индуктивности и емкости создает условия для протекания либо апериодического, либо колебательного процессов. В дальнейшем индексам «а» обозначаются величины для апериодического процесса, индексом «к» – для колебательного.

На основании решения операторных уравнений для первого участка работы находится ток:

$$I_2' = \frac{p^2 \cdot E(p)}{R \cdot (p^2 + a' \cdot p + d')}, \quad (2)$$

где $R = R_0' + R_n + R_m$, $R_1 = R_n + R_m$,

$$a' = \frac{c' \cdot R_0' \cdot R_n + L_m}{L_m \cdot c' \cdot R}, \quad d' = \frac{R_n}{L_m \cdot c' \cdot R}. \quad (3)$$

Заряд конденсатора заканчивается в момент прохождения через ноль зарядного тока емкости. Напряжение на обкладках конденсатора $U_c(t)$ нарастает от нуля до значения, определяемого временем заряда, и блокируется диодом VD . Из условия $i_2'(t) = 0$ находятся времена заряда конденсатора Δt_{1a} и Δt_{1k} :

$$\Delta t_{1a} = \frac{1}{b'} \arcsin \frac{2b'}{\sqrt{4(a')^2 - 4(b')^2}}, \quad (4)$$

$$\Delta t_{1k} = \frac{1}{\omega'} \arcsin \frac{2\omega'}{\sqrt{4(\omega')^2 + 4(a')^2}}, \quad (5)$$

$$\text{где } b' = \sqrt{\frac{(a')^2}{4} - d'}, \quad \omega' = \sqrt{d' - \frac{(a')^2}{4}}. \quad (6)$$

Значения Δt_{1a} и Δt_{1k} позволяют определить напряжение на конденсаторе в конце первого участка:

$$\frac{U_{c1}}{E} = \frac{2}{kc'R\sqrt{(a')^2 - 4(b')^2}} \times \exp \left[-\frac{a'}{2b'} \arcsin \frac{2b'}{\sqrt{(a')^2 - 4(b')^2}} \right], \quad (7)$$

$$\frac{U_{ck1}}{E} = \frac{2}{kc'R\sqrt{(\omega')^2 - 4(a')^2}} \times \exp \left[-\frac{a'}{2\omega'} \arcsin \frac{2\omega'}{\sqrt{(a')^2 + 4(\omega')^2}} \right] \quad (8)$$

Искомые величины времени заряда и напряжения на конденсаторе удобно выразить в относительных единицах, причем, в первом приближении считать $R_n > R_0'$. Постоянные времени и время восстановления рассматриваются относительно периода следования импульсов Т:

$$\frac{L_m}{R_n T} = \tau_0, \quad \frac{CR_n}{T} = \tau_3, \quad \frac{L_m}{R_0' T} = \tau_p, \quad \frac{t_a}{T} = \tau_a. \quad (9)$$

Время заряда и начальное напряжение на конденсаторе определяются из выражений:

$$\frac{\Delta t_{1a}}{T \tau_3} = \frac{2}{k^2 \sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{A}}, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta t_{1k}}{T \tau_3} = \frac{2}{k^2 \sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{4}{A} - 1}, \quad (11)$$

$$\frac{U_{ca1}}{E} = \frac{A}{k} \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{A}} \right], \quad (12)$$

$$\frac{U_{ck1}}{E} = \frac{A}{k} \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{4}{A} - 1} \right], \quad (13)$$

$$\text{где } A = \frac{k^2 \tau_0}{\tau_3}.$$

С момента времени t_1 начинается второй участок работы. В схеме рис. 3 остаются два элемента: индуктивность L_m и нагрузка R_n , процессы в которых определяются постоянной времени $\tau_n = L_m/R_n$ и начальным значением тока намагничивания. Значение тока нагрузки находится из выражения:

$$i_n(t) = \frac{E}{R_n} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_n} \right) \right] + i_m(t_1) \cdot \exp \left(-\frac{t}{\tau_n} \right). \quad (14)$$

При условии, что длительность импульса тока нагрузки подчиняется неравенству $t_n > \tau_n$, в нагрузке устанавливается значение тока $I_0 = E/R_n$.

В момент времени t_2 происходит включение тиристора VS_2 . Напряжение на конденсаторе не изменилось: $U_{c2} = U_{c1}$. Начинается третий участок работы. Схема замещения для него приведена на рис. 4. Начинается выключение тиристора VS_1 , сопровождаемое протеканием обратного тока в контуре $C-VS_2-VS_1$. Зная уменьшение напряжения U_{c2} на конденсаторе за счет протекания обратного

тока тиристора, можно определить напряжение конденсатора после выключения тиристора VS_1 . Изменение напряжения определяется по изменению заряда на обкладках конденсатора.

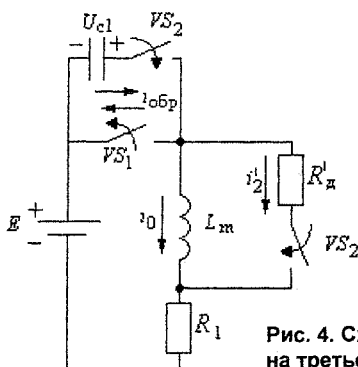


Рис. 4. Схема замещения на третьем участке работы

При протекании прямого тока в слоях р и п тиристора накапливается некоторый заряд $Q_{пр}$. Величина накопленного заряда является функцией прямого тока, и скорости изменения прямого тока в момент времени перед коммутацией. Заряд восстановления тиристора $Q_{в}$ определяется по методике, приведенной в [3].

Вычисляется ампер-секундный интеграл за последние 6 мкс проводимости прямого тока:

$$Q_{np} = I_a \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ас.} \quad \text{По зависимости}$$

$$\left| \frac{Q_{в}}{Q_{np}} \right| \% = f \left(\frac{di}{dt} \right) \quad \text{определяется } \left| Q_{в} / Q_{np} \right| \%. \quad \text{При-}$$

чем, при $\frac{di}{dt} > 100 \text{ А/мкс}$ кривая относительного

значения обратного заряда стремится к двукратному насыщению. Изменение напряжения на конденсаторе равно $\Delta U_c = Q_{в} / C$. Расчеты, проведенные для значений $I_a = (10 \dots 200) \text{ А}$ и соответствующих им значений коммутирующих емкостей, показали, что изменение напряжения на конденсаторе невелико по сравнению с начальным значением: $8\% U_{c0} > \Delta U_c > 0,5\% U_{c0}$. Это позволяет принять значение напряжения на конденсаторе в момент времени t_3 таким же, как для момента времени t_2 .

С момента t_3 начинается четвертый участок работы – процесс перезаряда конденсатора. Схема замещения приведена на рис. 5.

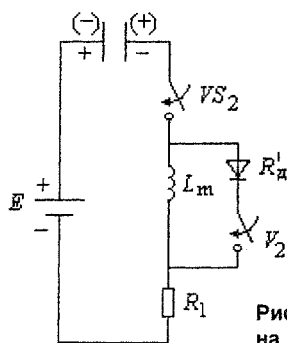


Рис. 5. Схема замещения на четвертом участке работы

Для нее найдены значения напряжений на конденсаторе $U_{ca}(t)$ и $U_{ck}(t)$.

Промежуток времени, в течение которого напряжение на конденсаторе уменьшается от начального начального значения до нуля, определяет время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристора VS_1 :

$$\frac{t_{ca}}{T\tau_3} = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{4}{B}}} \arcsin \left[\sqrt{1-\frac{4}{B}} \times \frac{\sqrt{1+\frac{U_{c1}}{E} \left(2+\frac{U_{c1}}{E} \right) \cdot \frac{4}{B}-1}}{\frac{4}{B} \left(1+\frac{U_{c1}}{E} \right)} \right], \quad (15)$$

$$\frac{t_{ck}}{T\tau_3} = \frac{2}{\sqrt{\frac{4}{B}-1}} \arcsin \left[\sqrt{\frac{4}{B}-1} \times \frac{\sqrt{1+\frac{U_{c1}}{E} \left(2+\frac{U_{c1}}{E} \right) \cdot \frac{4}{B}-1}}{\frac{4}{B} \left(1+\frac{U_{c1}}{E} \right)} \right], \quad (16)$$

В случае колебательного процесса перезаряда конденсатора на интервале времени Δt_3 величина напряжения на нем превышает E . Тогда после прекращения тока через тиристор VS_2 конденсатор разряжается по цепи $E-R_{н}-Tr-VS_3$, пока напряжение на нем не достигнет значения E . Начальное напряжение конденсатора U_{c0} для следующего периода работы равно E , так как в токе нагрузки должна быть пауза. Для работы на эрозионный промежуток желательно иметь аperiodический процесс при работе VS_2 , чтобы отсутствовало обратное напряжение на эрозионном промежутке.

Наибольшее обратное напряжение $U_{т10}$ к тиристор VS_1 прикладывается в момент t_2 , следовательно, оно равно U_{c1} . Наибольшее прямое напряжение $U_{т1}$, равное E , прикладывается при аperiodическом процессе с момента t_4 до начала второго периода работы, в колебательном процессе напряжение $U_{т1к}$ – в момент времени t_{m3} :

$$\begin{aligned} \frac{U_{т1к}}{E} = & \left(1 + \frac{U_{c0}}{E} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{t_{m3}}{2\tau_3 T} \right) \right] \cdot \left(\cos \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{\sqrt{4B-1}} \cdot \sin \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T} \right) - \frac{U_{c0}}{E} + \frac{2}{\sqrt{4B-1}} \cdot \left(1 + \frac{U_{c0}}{E} \right) \times \\ & \times \exp \left(-\frac{t_{m3}}{2\tau_3 T} \right) \cdot \sin \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\omega t_{m3} = \arcsin \left[1 + \frac{a(E + U_{c0} + i_{m3}R_0) - \frac{a^2(E + U_{c0})}{4\omega^2} - (E + U_{c0})}{2\omega cR} + \frac{\frac{a}{2}(E + U_{c0}) - \frac{a}{2\omega}(E + U_{c0}) + \frac{E + U_{c0} - i_{m3}R_0}{\omega cR}}{2} \right], \quad (18)$$

где $a = \frac{L_m + RR'C}{CL_mR}$, $d = \frac{R'_0}{CL_mR}$, $\omega = \sqrt{d - \frac{a^2}{4}}$,

$$B = \frac{k^2 \tau_3}{\tau_p}, \quad (19)$$

$$i_{m3} = \left(\frac{E + U_{c0}}{R} \cdot \frac{R'_0}{L_m} + \frac{2I_0 L_m d}{R} \right) \cdot \frac{\sin \omega t}{\omega} \cdot \exp \left(-\frac{a}{2} t \right) + \frac{2(E + U_{c0} + I_0 L_m a) - I_0 R'_0}{R} \left(\cos \omega t - \frac{a}{2\omega} \sin \omega t \right) \times \exp \left(-\frac{a}{2} t \right). \quad (20)$$

Наименьшее прямое напряжение, равное U_{c1} , прикладывается к тиристор VS_2 после заряда конденсатора. С точки зрения времени, представляемого на восстановление управляемости, тиристор VS_2 находится в лучших условиях, чем тиристор VS_1 . В течение интервала времени Δt_4 напряжение анод-катод тиристора VS_2 равно нулю, а после начала второго периода становится отрицательным. Наибольшее значение обратного напряжения оп-

ределено в конце интервала Δt_3 : $U_{T2D} = U_{C5}$.

Зажигание дугового разряда на эрозионном промежутке происходит в начале одного из периодов работы, в том числе, может произойти в первом периоде. Тогда в схемах рис. 1, 3, 4, 5 действует разность ЭДС ($E - E_3$) и выражения, полученные для активной нагрузки, справедливы для нагрузки в виде противо-ЭДС.

Выводы

1. Условия работы тиристора VS_1 тяжелее, чем тиристора VS_2 .
2. Время, предоставляемое на восстановление запирающих свойств тиристора VS_1 , необходимо определять для первого периода работы, связанного с первоначальным включением VS_1 .

Литература

1. Бронштейн, Л.И. Исследование и разработка источников питания для электроэрозионных станков на базе тиристорных прерывателей постоянного тока: дис. ... к.т.н. / Л.И. Бронштейн. – Львов, 1974. – 35 с.
2. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Соценко. – М.: Машиностроение, 1967. – 295 с.
3. Кремниевые управляемые вентили-тиристоры. Технический справочник / под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергия, 1964. – 360 с.

Сапрунова Надежда Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, окончила ЧПИ в 1962 г. по специальности «Автоматика и телемеханика».